

# 再生可能エネルギーの系統接続技術

小島康弘\*  
高野富裕\*\*  
泉井良夫\*\*\*

*Technologies for Renewable Energy Resources to Grid Connection*

*Yasuhiro Kojima, Tomihiro Takano, Yoshio Izui*

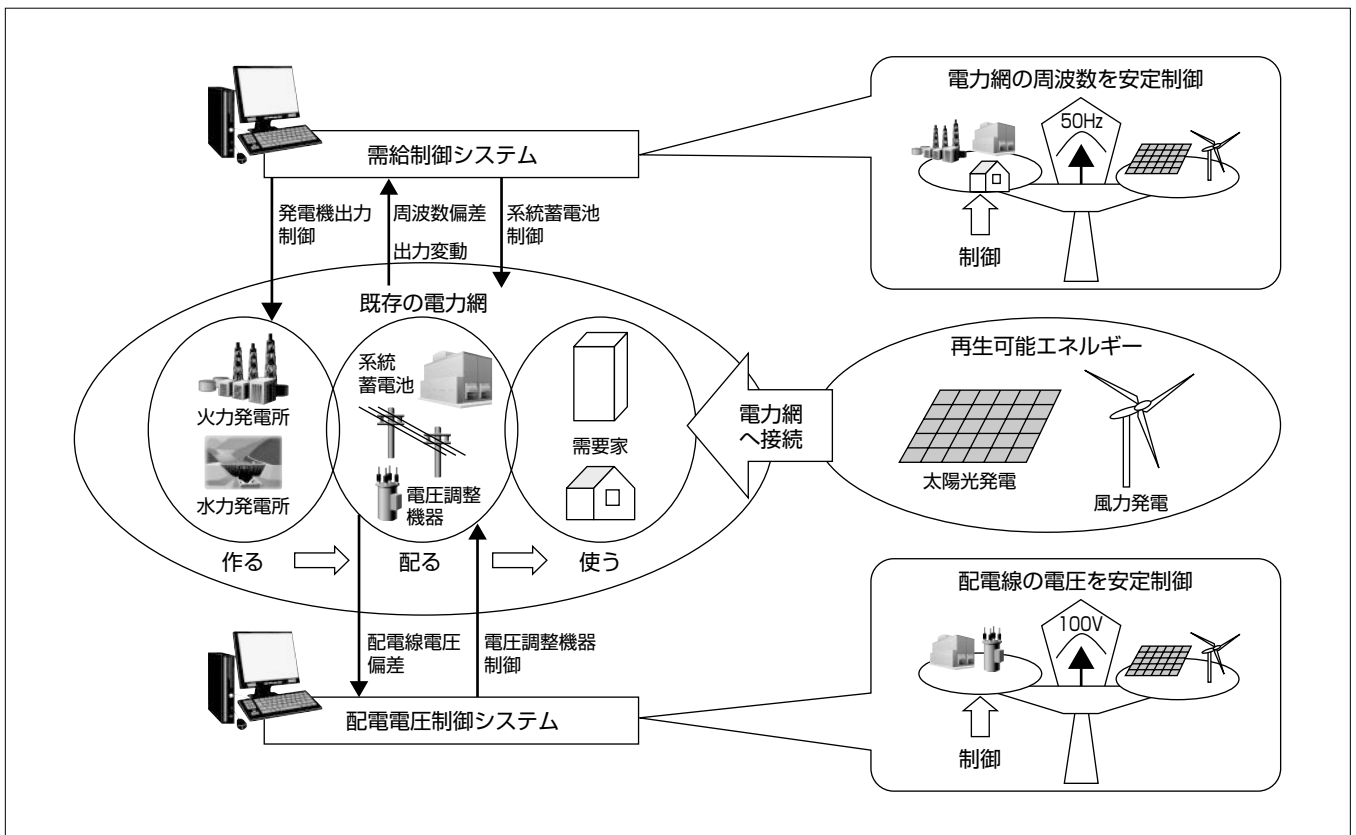
## 要旨

低炭素社会の実現を目的として、世界的に太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーの導入が拡大している。日本でも固定価格買取制度が導入され、この制度の認定容量は71.5GWと国内総需要の1/3を超過し、既に10GW以上が導入されている(2014年9月時点)。

一方、電力網はリアルタイムシステムであり、瞬時の高度な制御によって、電力網全体での周波数や配電電圧は規定値に維持されている。このため、不安定な電源が電力網に大量に導入されると、そのままでは周波数や配電電圧が規定値に維持できず、最悪の場合は大規模停電を引き起こす可能性がある。すなわち、再生可能エネルギー導入拡

大については、既存の電力網との接続に際し、様々な課題を解決する必要がある。

そこで、我々は、最重要課題である、周波数の安定化制御と配電線電圧の安定化制御を実現するため、再生可能エネルギー導入拡大に対応した、需給制御システムと配電電圧制御システムを開発した。さらに、自社実証実験設備で実地に検証を行い、所望の性能が得られることを確認している。これらのシステムを適用することによって、今後、さらに再生可能エネルギーの導入が拡大されても、電力網を安定制御することができ、安全・安心な電力供給を維持するとともに、低炭素化社会の実現に貢献できると考える。



## 需給制御と配電電圧制御による電力網の安定化制御

太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーは出力変動が不安定であり、大量・集中導入時には、周波数変動や電圧変動などによって電力網に悪影響を与える。このため、新たに、再生可能エネルギー導入拡大に対応した需給制御システムや配電電圧制御システムを開発し、自社実証実験設備を用いて性能検証を行っている。

1. ま え が き

近年、低炭素社会実現に向けた供給力の1つ、また日本のエネルギー安全保障を担う供給力の1つとして、太陽光発電(PhotoVoltaics: PV)、風力発電(Wind Turbine: WT)などの再生可能エネルギーの系統連系が加速している。一方、再生可能エネルギーは天候の影響を受けやすく発電量の変動が大きいため、電力品質の低下が懸念されている。図1に再生可能エネルギー導入時の課題をまとめる。

本稿では、周波数の安定化制御と配電線電圧の安定化制御を実現するため、再生可能エネルギー導入拡大に対応した、需給制御システムと配電電圧制御システムについて述べる。需給制御は、系統全体の需要と供給のバランスを制御し、電力網の周波数を一定に保つ。配電電圧制御は局所的な発電と消費のバランスを制御し、配電線の電圧を一定に保つ。いずれも自社実証実験設備で動作を検証し、一部は実系統に導入済みである。

2. 需給制御システム

2.1 システムの概要

需給制御では、需要の変動に対して火力発電・揚水発電など制御可能な発電機の運転台数と発電量を制御する。これによって需要と供給のバランスを取り、周波数の変動を適正範囲に維持してきた。この制御を実現するため、需給制御システムは、大きく分けると需要予測機能、需給計画機能、需給制御機能で構成される。需要予測は、気象・地域特性に基づいた実績から回帰分析モデル等によって翌日の需要を予測する。この予測情報に基づいて、需給計画で1日を通じた発電機の起動停止を決定、さらに時々刻々と変化する需要に基づいてリアルタイムの需給制御が行われる。しかし、電力系統に発電出力が不安定なPVやWTが大

量に連系した状況では、需要の予測・監視に加え、PVやWTに対する発電出力の予測・監視、これらの変動に備えた需給制御が必要となる。また近年、可変速揚水発電機や系統用蓄電池などPVやWTの発電出力変動の補償を目的とした大規模なエネルギー貯蔵装置の開発が進んでおり、従来、制御対象としていた発電機と、新たなエネルギー貯蔵装置や需要側との協調を取りながらPVやWTの発電を最大限活用できる、より高度な需給制御の実現が求められている。次に、再生可能エネルギー大量導入に対応するための、蓄電池を用いた需給制御技術を述べる<sup>(1)</sup>。

2.2 蓄電システムによる系統安定化制御

再生可能エネルギーの変動には、瞬時の短周期の問題と、1日を通じた長周期の問題がある。このような不確定な需給バランスに対応する対策として、蓄電池そのものの低コスト化という課題はあるものの、建設候補地の確保のしやすさ、着工から運用開始までのリードタイムの短さ等から、揚水発電機の代替として蓄電システムが期待される。蓄電池の選定は、電池の特性に応じて、短周期であればリチウム電池、長周期であればNAS<sup>(注1)</sup>電池が有望である。

そこで離島などの小規模系統の電力品質を運用目標値内に維持するために、蓄電池の有効電力制御として、従来の周波数変動を検出するΔF方式に追加して、新たに、連系線潮流変動を検出するΔP制御を開発した。各制御の概要を次に示す。

(1) ΔF制御

基準周波数との偏差に応じたフィードバック制御であり、従来の制御手法である。この方式は、周波数偏差が需給アンバランスによって発生することに基づいている。どのようなケースでも正しく動作するというメリットがあるものの、周波数偏差が発生しなければ制御できないため、後述のΔP制御に比べると制御動作は遅くなる課題があった。

(2) 連系線ΔP制御

離島系統に連系された再生可能エネルギーの出力変動は、離島系統の供給力である内燃力発電機の出力を変化させる。一方、発電機の燃料供給量は即座には変化しないため、内燃力発電機では機械入力と電気出力のアンバランスが発生し回転速度が変化する。その結果、周波数変動が発生する。ΔP制御は、このアンバランス量を直接とらえる方法で、発電機が接続する送電線潮流を計測、その短周期変動分を蓄電池で分担する。

(注1) NASは、日本硝子(株)の登録商標である。

2.3 実証結果

この安定化制御の実証結果について述べる。離島への再生可能エネルギー導入拡大に向け、経済産業省補助事業“平成24年度風力系統連系量拡大実証事業”の補助を受け、九州電力が同社の芦辺変電所(長崎県壱岐)に蓄電システムを導入した<sup>(2)</sup>。壱岐の系統規模は約35,000kWの離島であ

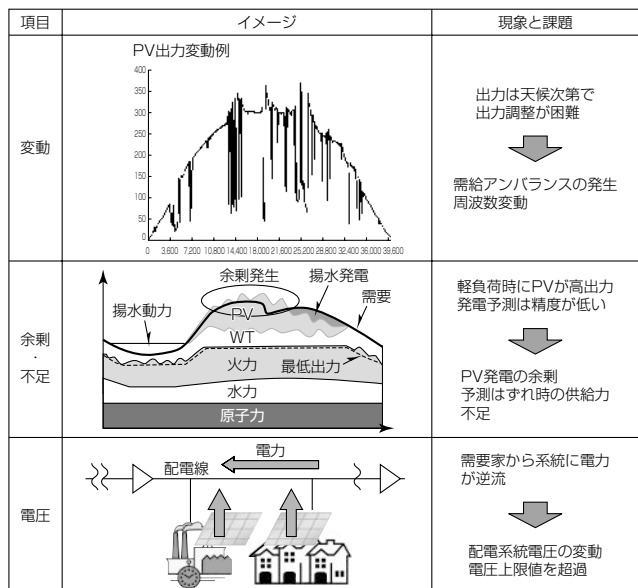


図1. 再生可能エネルギー導入時の課題

り、2つの内燃力発電所によって電力を供給しているが、2013年3月時点で、既に連系しているWTによって周波数調整力が限界に達していた。導入された蓄電システムは、500kWのPCS(Power Conditioning System)と200kWhのリチウムイオン電池とからなる蓄電池ユニット8並列(4,000kW, 1,600kWh)で構成される(図2)。

系統安定化方式には $\Delta F$ 制御、 $\Delta P$ 制御以外に、様々なケースで安定動作するよう両者を組み合わせた $\Delta P + \Delta F$ 制御も採用された(図3)。2012年度から実施中の実証試験では、 $\Delta P + \Delta F$ 制御によって連系線潮流の変動と併せ、内燃力発電機出力変動も抑制されることが示され、導入した蓄電システムの有効性が確認されている(図4)。

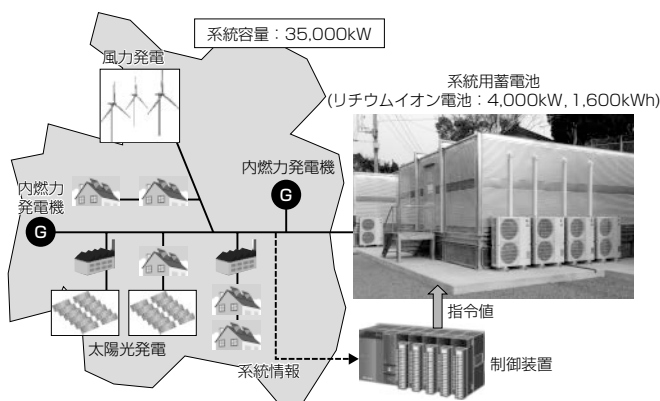


図2. 離島向け蓄電システム(短周期対策)

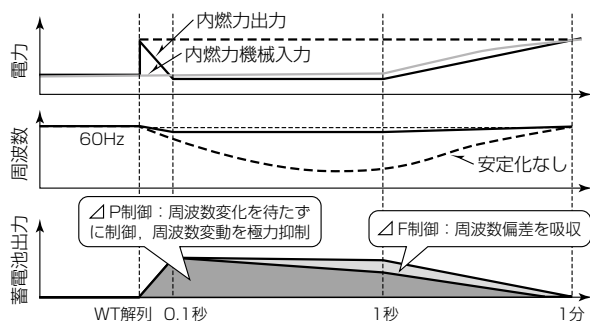


図3.  $\Delta P + \Delta F$ 制御方式の概要

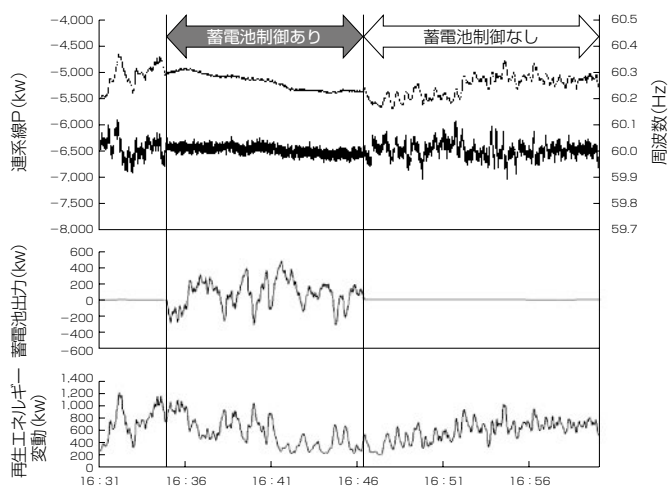


図4. 離島での実証実験結果の一例

### 3. 配電電圧制御システム

#### 3.1 システムの概要

PVに代表される分散型電源が配電系統へ大量導入されると、逆潮流に伴う電圧上昇や天候変化に伴う電圧変動などの電圧問題が懸念される。これら配電系統での電圧問題を解決するための、集中制御とローカル制御を組み合わせた2階層制御の配電電圧制御システムを開発した(図5)。

このシステムでは、通信網を介して、配電系統に設置したセンサ付開閉器から電流・電圧計測値を取り込み、配電自動化システム上に実装した最適潮流計算(Optimal Power Flow: OPF)を用いて、各制御対象の最適制御指令を決定する<sup>(3)</sup>。

ここで、配電機器と配電自動化システムと間の通信は、膨大な通信トラフィックの中、データ加工しつつ複数ネットワークを経るため、分レベルの時間を要する。一方でPVの出力変動に起因する電圧変動は秒レベルで発生するため、配電自動化システムから配電機器に直接制御指令を出す集中制御方式だけでは、電圧変動に追従できない可能性がある。そこで集中制御による全体最適化と、パワーエレクトロニクス機器の高速ローカル制御を組み合わせた2階層制御方式を開発した。

#### 3.2 2階層制御方式

配電電圧制御に用いる機器は、次の2種類に大別できる。

- (1) 機械式タップ切換え型電圧調整器(離散制御型)  
配電変電所のLRT(Load Ratio control Transformer)と配電線路上のSVR(Step Voltage Regulator)がある。これらは一種の変圧器であり、巻線比をタップ制御によって変更することで二次側電圧を上げ下げする。
- (2) パワーエレクトロニクス式無効電力制御電圧調整器(連続制御型)  
配電線路上のSVC(Static Var Compensator)と産業用PVのパワコン(PV-PCS)の2種類を考える。これらは、無効電力を配電線から出し入れすることによって、電圧を上げ下げする。

両者には次の特長がある。(1)は機械式のため制御回数が

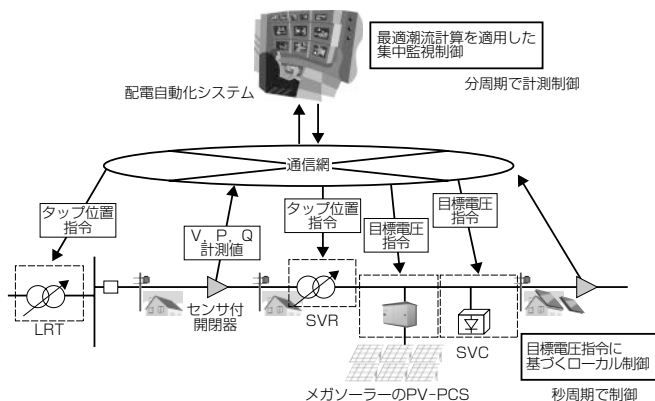


図5. 2階層制御の配電電圧制御システムの枠組み

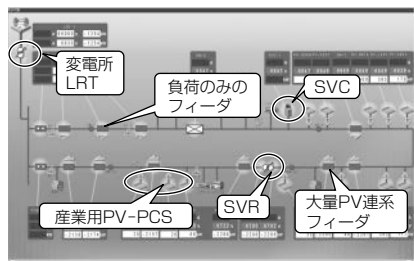
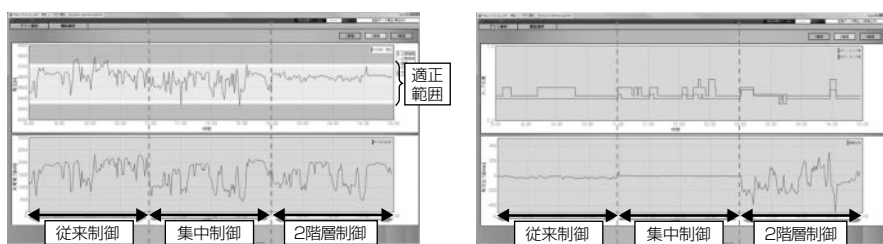


図 6. 尼崎地区実証配電システムの系統図画面



(a) 上：PV連系フィーダ末端電圧，  
下：PV出力総計  
(b) 上：LRT, SVRタップ動作，  
下：無効電力出力

図 7. 配電電圧制御の実証結果

1日20回程度に制限されるが、電力ロスが少ないという長所がある。(2)は(1)に比べて電力ロスが大きい、高速応答という長所がある。これらの長所を踏まえて2階層制御では、短周期の瞬発的な電圧変動は(2)のローカル制御でいったん吸収し、中長期の電圧変動は集中制御によって(1)に持ち替えることで、電力ロスを抑えつつ、電圧を適正維持することを目指す。このためOPFでは、目的関数を、(a)電圧逸脱量、(b)タップ動作回数、(c)無効電力制御による電力ロスの3要素とし、重みを(a) ≧ (b) ≧ (c)としている。

分周期の制御で、OPFは配電線各点の計測情報(V：電圧、P：有効電力、Q：無効電力)を基に、目的関数が最小となる、(1)と(2)との制御の組合せを最適計算によって求め、その結果得られるはずの電圧分布(制御後電圧分布)を潮流計算によって求める。決定した(1)の制御量(タップ位置)は、直接指令としてLRT、SVRへ送出する。一方(2)に対しては、制御後電圧分布の中、各機器の設置点電圧を目標電圧として与える。(2)のローカル制御では、与えられた目標電圧と現系統電圧との偏差をなくすように、PI(Proportional Integral)制御によって無効電力を1秒周期で制御する。したがって系統電圧変動が無ければ、(2)の各機器は、OPFで決定した無効電力量を一定出力することになるが、実際には次のOPF制御周期までの間に電圧変動が発生するため、その変動に応じてOPFが決定した電圧分布を維持するための、無効電力出力を随時変更することになる。

### 3.3 実証結果

開発システムの妥当性を、三菱電機尼崎地区スマートグリッド実証実験設備を用いて評価した。図6は、実証配電系統図画面であり、画面左上がLRTのある変電所である。負荷のみのフィーダ(画面上側境界点までの線)と、3MWのPVを大量連係した10kmと長めのフィーダ(画面下側から回り込んで上側境界点までの線)の2フィーダ構成とし、フィーダ間の末端電圧差が大きい系統を模擬した。PV大量連系フィーダには電圧調整器として変電所にLRT、フィーダ中間地点にSVR、末端地点にSVCのほか、産業用PV-PCSを分散配置している。実証では、次の3制御方式を比較評価した。

- (1) 従来制御：LRT, SVRによるローカル制御
- (2) 集中制御：LRT, SVRへの集中制御

- (3) 2階層制御：LRT, SVR, SVC, PV-PCSへの2階層制御

従来制御、集中制御、2階層制御の順に2時間ずつ実施した実証結果を図7に示す。図7(a)上部の系統電圧は、最も電圧上昇・変動が大きいPV大量連系フィーダの末端電圧である。中央の適正範囲に電圧を維持することが制御目的となる。

実証結果から、集中制御では従来制御と比較して、LRTとSVRのタップ動作回数が増加するものの、電圧上限逸脱の改善が確認できる。ただし大幅なPV出力変動に対しては、電圧制御が追従できず、微少な電圧逸脱が発生している。一方SVC、PV-PCSの無効電力制御(総容量450kVar)を活用した2階層制御では、電圧逸脱が完全に解消され、かつ電圧変動幅も約70%低減できた。また図7(b)上のタップ動作履歴から、集中制御と比較してLRTとSVRのタップ動作回数の抑制効果が確認できる。

この実証結果から、2階層制御による電圧逸脱改善効果とタップ動作抑制効果が確認できた。

## 4. む す び

再生可能エネルギーの系統接続によって発生する系統運用上の課題に対し、需給制御、配電電圧制御の観点からその対策と実証結果をまとめた。いずれも所望の結果が得られており、再生可能エネルギーの導入拡大に対して電力網を安定に制御し、安全・安心な電力供給の維持と低炭素社会の実現に貢献できると考えている。

## 参考文献

- (1) 小島康弘：スマートグリッド／スマートコミュニティを支えるEMS技術、計測と制御、53, No.1, 56～61 (2014)
- (2) Nomiyama, F., et al.: Demonstration Test of Frequency Fluctuation Suppression using a Storage Battery in Isolated Island System, CIGRE AORC Technical Meeting (2014)
- (3) 大野哲史, ほか：スマートグリッド対応の配電系統向け最適制御技術, 電気学会B部門大会, 271 (2010)